

文章编号:1672-6561(2013)01-0080-10

潜水质量安全评价指标体系的研建:以西安为例

李云峰¹, 李 波¹, 周亚楠², 孙亚乔¹, 王疆霞¹, 徐中华¹

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 河南省煤田地质局 物探测量队, 河南 郑州 450009)

摘 要:把潜水作为被保护的目标主体, 评价和研究在环境作用下潜水自身质量上的安全程度, 特别突出污水入渗对潜水安全的威胁; 创建了潜水质量安全评价指标体系——DRAUGHTS 体系, 建立了相应的计算公式。创建的潜水质量安全评价指标体系包含潜水埋深等级分量、大气降水净补给量等级分量、含水层介质的类别等级分量、渗透系数等级分量、包气带介质的类别等级分量、污水补给质量等级分量、污水补给数量等级分量以及土壤介质的类别等级分量共八大因子, 其中既含有制约潜水抗污染能力的多项内在因子, 又含有对潜水水质作用强度的多项外界因子, 特别强化了外界对潜水水质的作用。按照潜水质量安全指数, 由小到大划分出 5 个安全等级, 从 1 级到 5 级, 其安全程度由好到差。最后, 以西安市平原区作为干旱半干旱地区大都市的案例, 将 DRAUGHTS 体系应用到案例区的潜水质量安全评价研究中。结果表明: 案例区的潜水质量安全程度与渗漏补给潜水的污水质量和数量密切相关, 与实际情况吻合, 证明创建的 DRAUGHTS 体系在案例区的应用是成功的, 结果是可信的。该评价指标体系是可行的, 可以推广应用到类似条件地区的潜水质量安全评价中。

关键词:潜水; 质量安全; 指标体系; 评价因子; 污水补给; 综合指数; 西安

中图分类号: P641.132; P641.8 **文献标志码:** A

Establishment of Index System to Evaluate the Safety of Phreatic Water Quality: Taking Xi'an as an Example

LI Yun-feng¹, LI Bo¹, ZHOU Ya-nan², SUN Ya-qiao¹, WANG Jiang-xia¹, XU Zhong-hua¹

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Geophysical Survey Team, Coalfield Geology Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450009, Henan, China)

Abstract: Phreatic water was taking as the main subject to be protected, and the safety of phreatic water quality under the influence of environment was evaluated and studied, especially the threat of sewage infiltration to phreatic water safety; an index system to evaluate the safety of phreatic water quality (DRAUGHTS system) was established, and the corresponding equation was built. DRAUGHTS system had eight evaluation factors, including buried depth of groundwater table, precipitation infiltration rate, lithological character of aquifer, hydraulic conductivity, lithological character of aeration zone, quality of sewage supply, quantity of sewage supply and soil type grade components. Some internal factors restricted the anti-pollution ability of phreatic water, and some extrinsic factors influenced the quality of phreatic water, and environment effect on phreatic water quality was emphasized especially. Safety indexes of phreatic water quality were divided into five grades from the small to the large, and when the indexes were from 1 to 5, the safety was from best to worst. Finally, taking Xi'an as an example of the arid and semi-arid

收稿日期: 2012-11-02

基金项目: 高等学校学科创新引智计划项目(B08039); 国家自然科学基金项目(41002086)

作者简介: 李云峰(1945-), 男, 山东垦利人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: lyfphd@163.com。

region, DRAUGHTS system was applied to study the evaluation of phreatic water quality safety. The results showed that the safety of phreatic water quality was closely related to the quality and quantity of sewage from phreatic water percolating recharge in the case, which coincided with the actual situation; the application of DRAUGHTS system was successful, the result was believable. In general, DRAUGHTS system was feasible, and could be popularized in the similar regions.

Key words: phreatic water; quality safety; index system; evaluation factor; sewage recharge; composite index; Xi'an

0 引 言

地下水是地球水资源的重要组成部分,是工农业生产及生活用水的重要来源,但是人类对地下水资源的过度依赖、大量开发以及环境的污染,引发了一系列的地下水安全隐患。地下水安全是当今世界高度关注的重大问题之一。水安全问题的研究起步于 20 世纪 70 年代,早在 1972 年,联合国就发出警告:“水,将导致严重的社会危机。”

截止目前,对水安全的研究对象、研究内容,存在 3 种不同的认识:①评价、研究水作用下的环境安全问题,把环境看作被动体——“用水者”,研究的是“用水者的安全”^[1-6],可简称“安全的用水”;②评价、研究在环境作用下水自身的安全,可简称“水安全”^[7-8];③评价、研究“水安全”与“安全的用水”,把水自身的安全与用水者的安全合并进行评价、研究。笔者赞同对水安全的第 2 种认识“水安全”,本文研究的是在环境作用下地下水的重要成分之一——潜水自身的安全,因为只有潜水自身安全了,才能保证用水者用上“安全的水”。把潜水作为被保护的目标主体,研究潜水是否受到某种外界威胁,是否处在不安全的环境中。

潜水安全的研究应当包含 2 个方面,即质量上的自身安全及数量上的自身安全。笔者仅研究潜水质量自身安全,研究影响潜水质量安全的因素、各因素的影响程度、在各因素的综合影响下潜水的质量安全等级等。

近 40 年来,国际上越来越广泛开展的地下水脆弱性研究以及近十余年来中国学者关注的防污性研究或易污性研究^[9-33],都属于地下水质量上的自身安全研究。但是,无论是脆弱性研究还是防污性研究或易污性研究,均不能确切地表述地下水安全研究的对象和内容。例如:地下水脆弱性,从字义上理解,应当既含有质量上的脆弱性,又含有数量上的脆弱性,但是目前脆弱性研究其实只涉及质量上的而

完全不涉及数量上的;中国学者注意到这一不足,把脆弱性研究更正为防污性研究或易污性研究,经过如此更改,从概念上比较确切地表述了研究的是地下水质量上的自身安全问题,但是从研究对象和内容上来说,仍然存在缺陷,即脆弱性、防污性、易污性这三者均过分强调地下水对外界威胁的抵御能力,没有充分考虑外界环境对地下水安全的威胁,包括威胁因子及各因子威胁的力度。

鉴于此,笔者从研究潜水质量安全问题出发,把制约潜水自身安全状态的两个对立面——来自外界威胁与潜水自身所固有的抵御能力作为一个完整系统来研究,尤其充分强调了外界威胁,即污染因子及各因子污染的力度,然后进一步建立评价指标体系对这一系统进行条件分析、因子量化、指标计算、等级评价,确定潜水的等级,找出威胁潜水自身安全的主导环境因素,为保护潜水安全提供科学依据。

1 评价因子

潜水质量安全评价指标体系中,用以评价潜水质量安全程度的潜水质量安全评价综合指数是安全程度的最终数值表达,而这个数值的大小是由影响和制约潜水质量安全诸多评价因子的数值所决定的。评价因子的组合必须包含制约潜水自身安全状态的 2 个对立面——抵御能力和外界威胁,这是本文与前人研究的重大区别之一^[34-41]。因此,评价因子的确定是构建评价指标体系成败的关键之一。

1.1 评价因子的确定

确定的诸多因子中,既要含有制约潜水防污染能力的多项内在因子,又要含有对潜水水质作用较强(尤其是污染强度)的多项外界因子。

所谓地下水防污染能力又可称作地下水抗污性能、易污性能、含水层对污染物的敏感性等。许多学者从不同角度定义地下水防污性能^[42-45],笔者将其定义为:地下水在自然和人类活动影响下能够使其

自身水质免受污染的能力。

地下水防污性能分为 2 类:①天然防污性能,是指在一定的地质与水文地质条件下,人类活动所产生的污染物进入地下水的难易程度,它与含水层所处的地质与水文地质条件有关,与污染物性质无关;②特殊防污性能,是指地下水防止被某种或某类污染物污染的能力,它考虑污染物的性质及其在地下环境中的迁移能力^[30]。

目前,已有的地下水防污性能评价方法有 30 多种,典型的有 DRASTIC、GOD、SEEPAGE、Vierhuff、Legrand 等方法,其中以 DRASTIC 模型应用最为广泛。DRASTIC 模型由美国环保署于 1987 年提出,首先在美国获得成功,并先后被加拿大、南非和欧盟各国采用。中国的地下水防污性能研究也多与 DRASTIC 模型相关,或直接应用 DRASTIC 模型,或对 DRASTIC 模型进行改进。DRASTIC 模型有 4 个主要的假定:污染物源头在地表;地表污染物由大气降水、地表水、灌溉水的渗入带到地下;进入地下的污染物随水迁移;评价区域面积应不小于 4 047 m²。

DRASTIC 模型选取了对地下水防污性能影响较大且资料容易获得的七大因子:潜水埋深等级分量 D 、大气降水净补给量等级分量 R 、含水层介质的类别等级分量 A 、土壤介质的类别等级分量 S 、地形坡度等级分量 T_1 、包气带影响等级分量 I 以及含水层渗透系数等级分量 C 。这七大指标中,可以直接定量获得的指标有 D 、 R 、 T_1 、 C ,需要定性获得的指标有 A 、 S 、 I 。根据每个指标变化范围或其内在属性,划分为若干范围,每个范围给予一定的评分,构成评分体系。根据每个指标对地下水防污性能影响的相对重要程度,给予一个固定的权重,并构成权重体系。各指标评分的加权和 D_{ry} 即为地下水脆弱性指数 D_r 的原始值。 D_{ry} 的计算公式为

$$D_{ry} = 5D + 4R + 3A + 2S + T_1 + 5I + 3C \quad (1)$$

通过一个固定常数把 D_{ry} 换算为 D_r 。 D_r 是一个相对概念, D_r 值越大,相应区域的地下水越脆弱,越容易遭受污染。

借鉴 DRASTIC 模型,笔者增加了污水排放对潜水的威胁因素,研建了潜水质量安全评价指标体系——DRAUGHTS 体系。该体系包括八大因子:潜水埋深等级分量 D 、大气降水净补给量等级分量 R 、含水层介质的类别等级分量 A 、渗透系数等级分量 U 、包气带介质的类别等级分量 G 、污水补给质量等级分量 H 、污水补给数量等级分量 T 、土壤

介质的类别等级分量 S 。该体系各因子等级划分标准见表 1。

与前人的 DRASTIC 模型相比,DRAUGHTS 体系包含两大方面的因子,即 2 个对立面的因子——抵御能力和外界威胁。其中,反映抵御能力的多项因子与前人 DRASTIC 体系中的几大因子相近,删除了对污染作用关系甚微的因子(地形坡度),特别补充、强化了外界对潜水水质的作用因子(尤其是污水补给质量、污水补给数量),而得到保留的诸因子取值也有所不同。

表 1 中的八大因子各用到 2 个代号,一个带有下标“0”,一个不带下标。带有下标“0”的变量表示确定该因子等级的分级指标,不带下标的变量表示按分级指标确定的该因子的等级分量。例如:带下标“0”的“ $D_0 \leq 1.5$ ”表示潜水的埋深指标 $D_0 \leq 1.5$ m 时,它所对应的潜水埋深等级 $D=10$ 级。

1.2 评价因子的影响作用分类

从因子的分类角度来讲,制约潜水质量安全程度的诸多因子中,既含有制约潜水防污染能力的多项内在因子(描述潜水含水层系统所固有属性的因子),又含有外界对潜水水质作用强度(尤其是污染强度)的多项外在因子。其中,大气降水净补给量、污水补给质量以及污水补给数量是表征外界对潜水水质作用强弱的 3 个因子。

污水补给数量等级分量 T 表征的是对潜水作用的污水数量。该因子表征了同质的污水进入潜水含水层的数量愈多,则对潜水作用的强度愈大,这里用不同季节污水在含水层中的渗流范围来圈定污水补给数量等级。水质超标河流污染潜水的补给数量等级确定方法为:丰水季河流淹没范围最大,入渗潜水后的渗流范围也最大,但是河流淹没的时间却最短,致使入渗的时间也最短,单位面积上入渗的污水量也最低;而枯水季河流淹没范围虽然最小,但是全年累积的河流淹没时间却最长,致使入渗的时间也最长,单位面积上入渗的污水量也最多;平水季则处于中等。这三者的污水补给数量等级则是丰水季最低,枯水季最高,平水季居中。污水补给质量等级分量表征的是对潜水作用的污水质量,该因子表征了同量的污水质量愈差(量化指标:先逐个列出单个组分超标的水质类别,然后再按超标水质类别分别统计出各级类别的超标组分个数),则对潜水作用的强度也愈大。

污水补给数量等级分量 T 、污水补给质量等级分量 H 这 2 个因子主要是人类活动造成的,突出反映污染源对潜水水质的作用,这种作用往往是

表 1 DRAUGHTS 体系各因子等级划分标准

Tab. 1 Classification Standard of Different Factors in DRAUGHTS System

潜水埋深		大气降水净补给量		含水层介质		渗透系数	
埋深指标 D_0/m	等级 D	补给量指标 $R_0/(\text{mm} \cdot \text{年}^{-1})$	等级 R	含水层介质类别 A_0	等级 A	渗透系数指标 $U_0/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	等级 U
$D_0 \leq 1.5$	10	$R_0 > 450$	10	岩溶发育的灰岩	10	$U_0 > 81.5$	10
$1.5 < D_0 \leq 3$	9	$350 < R_0 \leq 450$	9	玄武岩	9	$40.7 < U_0 \leq 81.5$	8
$3 < D_0 \leq 5$	8	$270 < R_0 \leq 350$	8	砂和砂砾层	8	$28.5 < U_0 \leq 40.7$	6
$5 < D_0 \leq 10$	7	$200 < R_0 \leq 270$	7	砂岩、灰岩	7	$12.2 < U_0 \leq 28.5$	4
$10 < D_0 \leq 15$	5	$150 < R_0 \leq 200$	6	变质岩、火成岩	6	$4.1 < U_0 \leq 12.2$	2
$15 < D_0 \leq 22.5$	3	$100 < R_0 \leq 150$	5	砂土、砂砾层	5	$0 < U_0 \leq 4.1$	1
$22.5 < D_0 \leq 30$	2	$50 < R_0 \leq 100$	4	壤土、砂砾层	4		
$D_0 > 30$	1	$15 < R_0 \leq 50$	3	黏土质壤土、砂砾层	3		
		$5 < R_0 \leq 15$	2	页岩、黄土	2		
		$R_0 \leq 5$	1	砂土、黏土	1		

包气带介质		污水补给质量		污水补给数量		土壤介质	
包气带介质的类别 G_0	等级 G	污水水质超标指数 H_0	等级 H	污水在含水层中的渗流范围指标 T_0	等级 T	土壤介质的类别 S_0	等级 S
岩溶发育的灰岩	10	V 类水因子数大于等于 6	10	多年的最枯季污水侵入潜水的区域	10	薄或缺失	10
玄武岩	9	V 类水因子数为 4~5	9	计算年当年的最枯季污水侵入潜水的区域	9	砂砾层	9
砂和砂砾层	8	V 类水因子数为 3	8	平水季污水侵入潜水的区域	6	砂	8
砂岩、灰岩	7	V 类水因子数为 2	7	丰水季污水侵入潜水的区域	3	收缩或聚集的黏土	7
变质岩、火成岩	6	V 类水因子数为 1 且 IV 类水因子数大于等于 3	6	污水始终没有入侵到的潜水区域	1	砂质壤土	6
砂土、砂砾层	5	V 类水因子数为 1 且 IV 类水因子为 1~2	5			壤土	5
壤土、砂砾层	4	V 类水因子数为 1	4			粉砂质壤土,新黄土	4
黏土质壤土、砂砾层	3	IV 类水因子数大于等于 4	3			黏土质壤土,老黄土	3
页岩、黄土	2	IV 类水因子数为 1~3	2			未收缩和未聚集的黏土	1
砂土、黏土	1	超 III 类水因子数为 0	1				

评价区内局部范围,而不是整个评价区。这里用污水补给质量、污水补给数量 2 个因子共同来刻画污染强度。这 2 个因子强调的均是污水,即按照地表水环境质量评价为劣于Ⅲ类的水(归入Ⅳ类或Ⅴ类的水)。共同刻画污染强度的这 2 个因子,要协调处理,共进退。当没有了质量上超标的污水时,应当也没有了污水补给数量;反之,当没有了数量上超标的污水时,应当也没有了污水补给质量。因此,在不存在污水入渗的地段(计算单元),用来共同刻画污染强度的这 2 个因子都应按等级 1 来处理。大气降水净补给量等级分量 R 虽然表征的也是外界对潜水水质的作用,但是它反映的却是天然因素,并且是遍布整个评价区的。

潜水埋深等级分量 D 虽然是一个描述潜水含水层系统属性的因子,表征了不同等级的潜水埋深不同,则其抵御垂直入渗水污染的能力也不同,但是影响潜水埋深的因素却具有天然因素与人为因素的双重意义,即潜水埋深既受天然气候条件(降水、蒸发)作用的影响,又受人为开采影响。潜水埋深等级影响是遍布整个评价区的。

另外 4 个因子 A 、 U 、 G 、 S 全部是描述潜水含水层系统所固有属性的因子,表征的是抵御外界污染的能力。

2 评价等级划分

判断潜水质量的安全程度,依据评价综合指数

Z , Z 值由小到大划分为 1~5 级。从 1 级到 5 级,其安全程度由好到差。1 级区, $Z \leq 1$, 潜水质量安全程度好; 2 级区, $1 < Z \leq 2$, 潜水质量安全程度较好; 3 级区, $2 < Z \leq 3$, 潜水质量安全程度中等; 4 级区, $3 < Z \leq 4$, 潜水质量安全程度较差; 5 级区, $4 < Z \leq 5$, 潜水质量安全程度差。综合指数越小的区域, 其安全程度越好, 反之亦然。

3 评价综合指数

研建的潜水质量安全评价综合指数原始值为

$$Z_y = 5D + 4R + 3A + 3U + 5G + 25H + 10T + 2S \quad (2)$$

式中: Z_y 为潜水质量安全评价综合指数 Z 的原始值。

Z_y 介于 57~570 之间。设置一个合适的系数值, 把 Z_y 转换为与等级序数相对应的数值, 即把 Z_y 乘以一个系数 1/114, 转换为潜水质量安全指数 Z , 其计算公式为

$$Z = Z_y / 114 = (5D + 4R + 3A + 3U + 5G + 25H + 10T + 2S) / 114 \quad (3)$$

用式(3)计算出的 Z 最大值为 5, 最小值为 0.5。

表 2 主要河流水文特征

Tab. 2 Hydrological Characteristics of Main Rivers

河流类型	河流名称	流域面积/ km ²	河流长度/ km	平均比降/ 10 ⁻³	多年平均径流量/ 10 ⁸ m ³	备注
西安市 辖区境 内河	黑河	2 283	123.6	8.70	6.57	发源于秦岭太白山, 干流全长 90 km, 峪口以上流域面积 1 481 km ²
	涝峪河	665	86.0	10.20	1.55	发源于户县静墙(海拔 2 822 m)的秦岭梁(西河)
	沔河	1 460	81.9	8.80	4.57	发源于秦岭南碾子沟, 支流有高冠峪、太平峪和漓河
	浐河	760	66.4	9.90	1.56	发源于紫云山南月亮石沟纳岱峪河、库峪河之后, 始称浐河
	灞河	1 601	107.0	2.00	6.87	发源于蓝田县灞源乡东北箭峪南九道沟, 主要支流有清峪河、网峪河和浐河
入境河	泾河	45 373	455.1	2.47	20.00	发源于六盘山脉, 横跨宁、甘、陕三省, 于高陵县泾渭堡汇入渭河, 全长 455.1 km
	石川河	4 585	144.0	0.64	2.15	发源于陕西中部铜川、照金区域的山区, 经耀县、富平、阎良后流入渭河
过境河	渭河	97 299	818.0	3.85	55.70	发源于甘肃省渭源县鸟鼠山, 是西安最大的过境河, 全长 818 km

根据地下水埋藏条件、水动力性质, 并结合地下水开发利用的实际情况, 将案例区 300 m 以浅的含水岩组划分为潜水与承压水两大含水岩组。潜水的形成与含水岩组的分布, 受地貌及岩相带控制。不同的地貌部位, 含水岩组的岩性、结构、厚度及潜水位埋深、富水性等均有较大差异。渭河冲积平原为冲积相含水岩组, 含水层厚度分布较稳定, 岩性较均一, 富水性一般较强。洪积平原为洪积相含水岩组, 厚度、岩性及富水性在纵横方向上变化极为明显。

按照 Z 值的计算结果, 对照潜水质量安全等级的划分指标界线, 确定潜水质量安全等级。

4 案例分析

以西安市平原区作为干旱半干旱地区大都市的案例, 把研建的潜水安全评价指标体系——DRAUGHTS 体系应用到案例区的潜水安全评价研究中, 验证其可行性。

4.1 案例概况

西安市平原区位于关中平原中部, 为陕西省西安市行政辖区的平原区全部, 面积约 4 633 km²。地形地貌界限清晰明显, 从南向北依次排列为: 黄土丘陵、黄土台塬、冲洪积扇倾斜平原、渭河及支流阶地冲积平原。地表径流分布特征与降水分布基本一致, 径流量由南向北递减, 且年内与年际分配不均, 年径流量的 50%~60% 集中在汛期(7 月至 10 月), 其余 8 个月仅占年径流的 40%~50%, 枯水季节一般在冬春或春夏之间, 地表径流年际变化很大, 丰水年径流量为枯水年的 4~7 倍。主要河流有渭、泾、黑、涝峪、沔、浐、灞、石川河, 主要特征见表 2。松散岩类孔隙水分布广泛。

黄土台塬赋存于黄土层中的潜水, 因孔隙-裂缝在垂直和水平方向发育不均, 富水性差异很大。根据上述各控制因素, 将潜水划分 3 个含水岩组。

4.1.1 冲积层孔隙潜水含水岩组

冲积层孔隙潜水含水岩组分布于渭河及支流漫滩和河谷阶地, 含水岩组为砂、砂砾卵石层。高阶地上部被黄土覆盖, 岩性较均一, 颗粒粗, 透水性较好, 厚 5~80 m。含水层一般近河流厚, 远河流薄, 水位埋深 1~40 m, 低级阶地较浅, 一般小于 10 m, 高阶

地埋深10~40 m。岩层富水性与含水层厚度、埋藏条件、补给条件等密切相关,一般在靠近渭河及较大支流附近富水性较好,远离河流则富水性较差。

4.1.2 洪积层孔隙潜水含水岩组

洪积层孔隙潜水含水岩组分布于山前洪积平原一带,其水文地质特征由南向北均具有一定变化规律,地下水位埋深越接近山前地带埋深愈大,一般1~30 m,最深30~40 m。越到洪积平原前缘,水位埋深越浅,有的甚至溢出地表。含水层厚度10~60 m,岩性为含砂砾卵石,分布不稳定。在峪口及两侧厚度大,颗粒粗,多为泥砂砾卵石、漂石,渗透系数 $20\sim 50\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,富水性较好,单井出水量 $500\sim 3\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,扇间及前缘地带含水层厚度减薄以至尖灭,分选性差,含泥量增多,渗透系数为 $3\sim 20\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,富水性较差,单井出水量小于 $500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,局部地段可达 $500\sim 1\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

4.1.3 黄土层潜水含水岩组

黄土层潜水含水岩组分布在黄土台塬区,含水层岩性主要为黄土、古土壤,厚度数十米。地下水赋存于黄土及古土壤的大孔隙及裂隙中,具有各向异性和多层性的特点。在垂直方向上,由上至下孔隙-裂隙发育程度减弱,古土壤层的孔隙-裂隙发育良好,常在土壤团粒间形成较大孔洞,利于地下水赋存及运移。黄土含水层呈多层性,塬区沟谷内在不同高度上有泉溢出。从古土壤层中溢出最多,流量较大。成层钙质结构层常起隔水作用,但分布不稳定,不能构成稳定的隔水层。黄土含水层富水性和埋藏深度与塬面形态和地质结构密切相关,一般塬面完整平坦的地段或较开阔的洼地中,水位埋藏较浅,一般为10~50 m,富水性较好,为中等富水或弱富水。

4.2 八大因子等级分区图绘制

进行潜水质量安全评价,首先需完成八大因子等级分量确定以及等级分区图的绘制。评价因子等级分量的确定,是潜水质量安全评价工作中最关键、耗时最长、耗费最大、需要基础数据资料最多的一步。为了确定西安市平原区潜水质量安全评价八大因子的等级分量,先后开展了以下基础资料准备及基础图件的绘制工作。

(1)广泛搜集西安市平原区的气象、水文、地质、水文地质勘查等资料,全面分析案例区的水文地质条件。根据确定八大因子等级分量的需要,分别绘制了数十套基础数据图件。

(2)照按陕西省第一水文地质工程地质大队1977年出版的关中地区1:200 000水文地质图系,

数字化绘制了西安市平原区地貌分区图。按地貌单元、水文地质条件,确定土壤介质类别、包气带介质类别、潜水含水层介质类别、潜水含水层渗透系数、大气降水入渗系数等分区。

(3)搜集西安市平原区各县(区)建国以来历年大气降水量资料,绘制西安市平原区大气降水量等级分区图、大气降水净补给量等级分区图。

(4)搜集最近期的全区潜水埋深统测资料,为绘制西安市平原区潜水埋深等级分区图提供了基础数据,并分别绘制西安市平原区丰水季(平水季、枯水季)潜水埋深等级分区图。

(5)全面搜集全区1:50 000地形图纸质资料(1954年北京坐标系),经数字化后绘制案例区地形等高线图。

(6)用地形等高线图与丰水季(平水季、枯水季)潜水埋深等值线数据叠加生成西安市平原区丰水季(平水季、枯水季)潜水流场图。

(7)利用这些流场图,分别圈定丰水季、平水季、枯水季河水与潜水的补、排关系转折界线,并将这些界线作为劣质河水污染潜水的污染范围、污染数量的分区界线,为河流污染潜水的污水补给数量等级分量的确定提供依据。

(8)在完成上述基础资料整理、基础图件绘制的前提下,借用MapGIS软件分别绘制八大因子等级分区图。

4.3 评价结果

4.3.1 评价等级的确定

八大因子的等级分区图全部绘制完成后,借用MapGIS软件的叠加功能,按照潜水质量安全评价综合指数 Z 的计算公式(式(3)),进行八因子的叠加计算。 Z 值最大为5,最小为0.5。按照 Z 值的区间,划分出潜水质量安全等级分区,并绘制出等级分区图(图1)。

4.3.2 结果分析

从图1可以看出,案例区潜水质量安全程度最差的区(5级区)、较差的区(4级区)均位于主干河流的河谷区。其中:5级区位于西安城区以东渭河下游段河谷区的中轴条带区;4级区均位于5级区两侧的河谷区内或位于不存在5级区的主干河谷区的中轴条带区。安全程度最好的区(1级区)、较好的区(2级区)均位于主干河谷区之外的河间地块区。其中:1级区均位于河间地块区的地势最高区段,即潜水位埋深最大、包气带黏性土层厚度最大的区段;2级区均位于河间地块区的地势亚高区段,即潜水

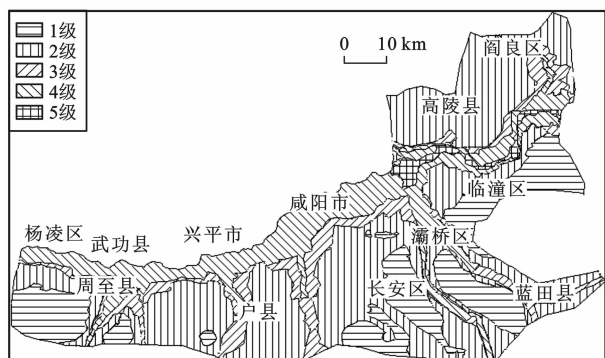


图 1 潜水质量安全等级分区

Fig. 1 Division of Safety Grade of Phreatic Water Quality

位埋深次大、包气带黏性土层厚度次大的区段;或位于不存在 1 级区的整个河间地块区。安全程度中等区(3 级区)均位于 4 级区两侧的河谷区边缘区段,或位于不存在 4、5 级区的主干河谷区的中轴条带区。

从图 1 还可以看出,潜水质量安全程度与渗漏补给潜水的污水质量、污水数量密切相关。安全程度最差的区(5 级区),补给潜水的污水质量最差、污水数量最多,位于主干河流靠近最下游的河谷区;较差的区(4 级区),补给潜水的污水质量较差、污水数量较多,位于河流中、下游河谷区。质量安全等级的这一评价结果是合理的。安全程度最好的区(1 级区)、较好的区(2 级区)均不存在污水补给潜水,位于主干河谷区之外的河间地块区。质量安全等级的这一评价结果也是合理的。

总体来看,案例区潜水质量安全程度与渗漏补给潜水的污水质量和数量密切相关,潜水质量安全等级的评价结果是合理的,证明笔者创建的潜水质量安全评价指标体系在案例区的实际应用是成功的,结果是可信的。该评价指标体系是可行的,可以推广应用到类似条件地区潜水质量安全评价中。

5 结 语

(1) 笔者创建了潜水质量安全评价指标体系——DRAUGHTS 体系。该体系包含潜水埋深等级分量 D 、大气降水净补给量等级分量 R 、含水层介质的类别等级分量 A 、渗透系数等级分量 U 、包气带介质的类别等级分量 G 、污水补给质量等级分量 H 、污水补给数量等级分量 T 、土壤介质的类别等级分量 S 共八大因子。

(2) DRAUGHTS 体系中所包含的 D 、 R 、 A 、 U 、 G 、 H 、 T 、 S 八大因子,既含有制约潜水抗污染能力的多项内在因子,又含有对潜水水质作用强度的多

项外界因子,特别强化了外界污水对潜水水质的作用(污水补给质量、污水补给数量)。

(3) 建立潜水质量安全指数 Z 的计算公式。按照 Z 值由小到大划分为 1~5 级,从 1 级到 5 级,其安全程度由好到差。

(4) 以西安市平原区作为干旱半干旱地区大都市的案例,把研建的 DRAUGHTS 体系应用到案例区的潜水质量安全评价研究中。结果表明:案例区潜水质量安全程度与渗漏补给潜水的污水质量和数量密切相关,证明本文创建的 DRAUGHTS 体系在案例区的应用是成功的,结果是可信的。该评价指标体系是可行的,可以推广应用到类似条件地区的潜水质量安全评价中。

参考文献:

References:

- [1] 简明凯,杨凤栋,韩晓彤. 故城县农村饮水安全问题分析与对策[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 114-115.
JIAN Ming-kai, YANG Feng-dong, HAN Xiao-tong. Analysis and Countermeasures on Rural Drinking Water Safety in Gucheng County[J]. South-to-north Water Diversion and Water Science and Technology, 2012, 10(2): 114-115.
- [2] 徐 辉,贾绍凤,李润杰,等. 三江源地区饮水安全问题探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6): 62-65.
XU Hui, JIA Shao-feng, LI Run-jie, et al. Discussion on Security of Drinking Water in Sanjiangyuan Region [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(6): 62-65.
- [3] 汪美华,张 隆,柴义伦. 皖南山区农村地下水化学特征分析与水质评价[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 37-41.
WANG Mei-hua, ZHANG Long, CHAI Yi-lun. Hydrochemical Characteristics and Water Quality of Groundwater of Linzhu County in Southern Anhui [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(5): 37-41.
- [4] 张兆吉,费宇红,郭春艳,等. 华北平原区域地下水污染评价[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2012, 42(5): 1456-1461.
ZHANG Zhao-ji, FEI Yu-hong, GUO Chun-yan, et al. Regional Groundwater Contamination Assessment in the North China Plain[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(5): 1456-1461.
- [5] 郇 环,王金生,滕彦国,等. 基于过程模拟的地下水

- 脆弱性评价研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(1): 121-126.
- HUAN Huan, WANG Jin-sheng, TENG Yan-guo, et al. Progress in Groundwater Vulnerability Based on Process Simulation[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(1): 121-126.
- [6] 文冬光, 林良俊, 孙继朝, 等. 中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J]. 地球科学, 2012, 37(2): 220-228.
- WEN Dong-guang, LIN Liang-jun, SUN Ji-chao, et al. Groundwater Quality and Contamination Assessment in the Main Plains of Eastern China [J]. Earth Science, 2012, 37(2): 220-228.
- [7] 段琪彩, 黄英, 王杰. 云南省水循环特性及水安全剖析[J]. 人民长江, 2012, 43(13): 17-20.
- DUAN Qi-cai, HUANG Ying, WANG Jie. Analysis of Characteristics of Water Cycle and Water Safety in Yunnan Province[J]. Yangtze River, 2012, 43(13): 17-20.
- [8] 王文科, 杨泽元, 程东会, 等. 面向生态的干旱半干旱地区区域地下水资源评价的方法体系[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(1): 159-167.
- WANG Wen-ke, YANG Ze-yuan, CHENG Dong-hui, et al. Methods of Ecology-oriented Groundwater Resource Assessment in Arid and Semi-arid Area[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(1): 159-167.
- [9] 刘细元. 江西省吉安市地下水系统防污性能评价[J]. 地质调查与研究, 2006, 29(3): 217-221.
- LIU Xi-yuan. Appraisalment of Autipollution Capability of Groundwater Systems in Ji'an City, Jiangxi Province [J]. Geological Survey and Research, 2006, 29(3): 217-221.
- [10] 王万金, 陈登齐. 西南岩溶区典型地下河流域地下水脆弱性评价[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 45-49.
- WANG Wan-jin, CHEN Deng-qi. Evaluation of Fragibility of Groundwater in a Typical Subterranean River Basin in Karst Area of Southwest China[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 45-49.
- [11] 宋小庆, 彭钦. 贵州织金县城岩溶地下水脆弱性评价[J]. 贵州地质, 2012, 29(2): 99-103.
- SONG Xiao-qing, PENG Qin. Assessment of Vulnerability of Karst Groundwater of Zhijin in Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2012, 29(2): 99-103.
- [12] 姜桂华, 王文科, 乔小英, 等. 关中盆地地下水特殊脆弱性及其评价[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(6): 1106-1110.
- JIANG Gui-hua, WANG Wen-ke, QIAO Xiao-ying, et al. Groundwater Special Vulnerability and Its Assessment in Guanzhong Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(6): 1106-1110.
- [13] 杨贵芳, 姜月华, 李云. 基于 DRASTIC 模型的城市地下水脆弱性评价综述[J]. 地下水, 2012, 34(1): 5-8.
- YANG Gui-fang, JIANG Yue-hua, LI Yun. Review on Urban Groundwater Vulnerability Assessment by Using DRASTIC Model [J]. Ground Water, 2012, 34(1): 5-8.
- [14] JAVADI S, KAVEHKAR N, MOUSAVIZADEH M H, et al. Modification of DRASTIC Model to Map Groundwater Vulnerability to Pollution Using Nitrate Measurements in Agricultural Areas[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(2): 239-249.
- [15] VOUDOURIS K, KAZAKIS N, POLEMIO M, et al. Assessment of Intrinsic Vulnerability Using the DRASTIC Model and GIS in the Kiti Aquifer, Cyprus [J]. European Water, 2010, 30(1): 13-24.
- [16] 严明疆. 地下水系统脆弱性对人类活动响应研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2006.
- YAN Ming-jiang. Research on Groundwater System Vulnerability Responding on Anthropic [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2006.
- [17] 杨旭东, 孙建平, 魏玉梅. 地下水系统脆弱性评价探讨[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(1): 1-4.
- YANG Xu-dong, SUN Jian-ping, WEI Yu-mei. Discussion on Groundwater Vulnerability Assessment [J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(1): 1-4.
- [18] 孙才志, 林山杉. 地下水脆弱性概念的发展过程与评价现状及研究前景[J]. 吉林地质, 2000, 19(1): 30-36.
- SUN Cai-zhi, LIN Shan-shan. Review of Ground Water Vulnerability Concept and Assessment [J]. Jilin Geology, 2000, 19(1): 30-36.
- [19] 孙才志, 潘俊. 地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景[J]. 水科学进展, 1999, 10(4): 444-449.
- SUN Cai-zhi, PAN Jun. Concept and Assessment of Groundwater Vulnerability and Its Future Prospect [J]. Advances in Water Science, 1999, 10(4): 444-449.
- [20] 孙才志, 左海军, 栾天新. 下辽河平原地下水脆弱性研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(5): 943-948.
- SUN Cai-zhi, ZUO Hai-jun, LUAN Tian-xin. Research on Groundwater Vulnerability Assessment of

- the Lower Liaohe River Plain[J]. Journal of Jinlin University: Earth Science Edition, 2007, 37(5): 943-948.
- [21] 张保祥. 黄河流域地下水脆弱性评价与水源保护区划分研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- ZHANG Bao-xiang. Groundwater Vulnerability Assessment and Wellhead Protection Area Delineation in Huangshuihe River Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- [22] 马金珠, 高前兆. 干旱区地下水脆弱性特征及评价方法探讨[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 44-49.
- MA Jin-zhu, GAO Qian-zhao. Groundwater Vulnerability and Its Assessing Method in the Arid Land of NW China[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(1): 44-49.
- [23] 鄂建, 孙爱荣, 钟新永. DRASTIC 模型的缺陷与改进方法探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 102-107.
- E Jian, SUN Ai-rong, ZHONG Xin-yong. Inadequacies of DRASTIC Model and Discussion of Improvement[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(1): 102-107.
- [24] 姜桂华. 地下水脆弱性研究进展[J]. 世界地质, 2002, 21(1): 33-38.
- JIANG Gui-hua. The Development of Study on Groundwater Vulnerability[J]. World Geology, 2002, 21(1): 33-38.
- [25] 方樟, 肖长来, 梁秀娟, 等. 松嫩平原地下水脆弱性模糊综合评价[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(3): 546-550.
- FANG Zhang, XIAO Chang-lai, LIANG Xiu-juan, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation of the Groundwater Vulnerability in Songnen Plain[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(3): 546-550.
- [26] 杨庆, 栾茂田, 崇金著, 等. DRASTIC 指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 684-688.
- YANG Qing, LUAN Mao-tian, CHONG Jin-zhu, et al. Study of Application of DRASTIC Index to Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution of Dalian City[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39(5): 684-688.
- [27] 金爱芳, 李广贺, 张旭. 地下水污染风险源识别与分级方法[J]. 地球科学, 2012, 37(2): 247-252.
- JIN Ai-fang, LI Guang-he, ZHANG Xu. The Risk Source Identification and Classification Methodology of Groundwater Pollution[J]. Earth Science, 2012, 37(2): 247-252.
- [28] 孙爱荣, 周爱国, 梁合诚, 等. 九江市地下水易污性评价——基于 DPASTIC 指标的模糊综合评价模型[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(4): 499-503.
- SUN Ai-rong, ZHOU Ai-guo, LIANG He-cheng, et al. Assessment of Underwater Vulnerability in Jiujiang City—Fuzzy Synthesis Approach Based on DPASTIC Indexes[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(4): 499-503.
- [29] 钟佐燊. 地下水防污性能评价方法探讨[J]. 地学前缘, 2005, 12(增): 3-11.
- ZHONG Zuo-shen. A Discussion of Groundwater Vulnerability Assessment Methods[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(S): 3-11.
- [30] 李辉, 陈鸿汉, 何江涛. 湛江市浅层地下水防污性能评价[J]. 华北水利水电学院学报, 2006, 27(4): 98-100.
- LI Hui, CHEN Hong-han, HE Jiang-tao. Assessment of Shallow Groundwater Vulnerability in Zhanjiang City[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2006, 27(4): 98-100.
- [31] 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 地下水污染风险评价的迭置指数法研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(10): 1140-1147.
- TENG Yan-guo, SU Jie, ZHAI Yuan-zheng, et al. A Review on the Overlay and Index Method for Groundwater Pollution Risk Assessment[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(10): 1140-1147.
- [32] 张新钰, 辛宝东, 王晓红, 等. 我国地下水污染研究进展[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 415-422.
- ZHANG Xin-yu, XIN Bao-dong, WANG Xiao-hong, et al. Progress in Research on Groundwater Pollution in Our Country[J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 415-422.
- [33] 王晓红, 张新钰, 林健. 有机污染场地地下水风险评价指标体系构建的探讨[J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 126-132.
- WANG Xiao-hong, ZHANG Xin-yu, LIN Jian. Investigation on the Establishment of Index System for Groundwater Risk Assessment at the Organically Contaminated Site[J]. Earth and Environment, 2012, 40(1): 126-132.
- [34] GOMEZDEL CAMPO E, DICKERSON J R. A Modified DRASTIC Model for Siting Confined Animal Feeding Operations in Williams County, Ohio, USA[J]. Environmental Geology, 2008, 55(8): 1821-1832.
- [35] 付素蓉, 王焰新, 蔡鹤生, 等. 城市地下水污染敏感性分析[J]. 地球科学, 2000, 25(5): 482-486.

- FU Su-rong, WANG Yan-xin, CAI He-sheng, et al. Vulnerability to Contamination of Groundwater in Urban Regions[J]. *Earth Science*, 2000, 25(5): 482-486.
- [36] NAQA A E. Aquifer Vulnerability Assessment Using the DRASTIC Model at Russeifa Landfill, Northeast Jordan[J]. *Environmental Geology*, 2004, 47(1): 51-62.
- [37] SENER E, SENER S, DAVRAZ A. Assessment of Aquifer Vulnerability Based on GIS and DRASTIC Methods; A Case Study of the Senikent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2009, 17(8): 2023-2035.
- [38] AHMED A A. Using Generic and Pesticide DRASTIC GIS-based Models for Vulnerability Assessment of the Quaternary Aquifer at Sohag, Egypt[J]. *Hydrogeology Journal*, 2009, 17(5): 1203-1217.
- [39] BOUGHRIBA M, BARKAOUI A, ZARHLOULE Y, et al. Groundwater Vulnerability and Risk Mapping of the Angad Transboundary Aquifer Using DRASTIC Index Method in GIS Environment [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2010, 3(2): 207-220.
- [40] AKHAVAN S, MOUSAVI S F, ABEDI-KOUPAI J, et al. Conditioning DRASTIC Model to Simulate Nitrate Pollution Case Study; Hamadan-Bahar Plain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(6): 1155-1167.
- [41] SINAN M, RAZACK M. An Extension to the DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability to Pollution: Application to the Haouz Aquifer of Marrakech (Morocco) [J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(2): 349-363.
- [42] 姜志群, 朱元甦. 地下水污染敏感性评价中 DRASTIC 法的应用[J]. *河海大学学报*, 2001, 29(2): 100-103.
- JIANG Zhi-qun, ZHU Yuan-sheng. Evaluating Regional Groundwater Pollution Potential with DRASTIC for Daqinghe Basin[J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(2): 100-103.
- [43] 于向前, 李云峰, 赵义平, 等. 基于 DRASTIC 的地下水防污性能评价组合权重分配方法[J]. *地球与环境*, 2012, 40(4): 568-572.
- YU Xiang-qian, LI Yun-feng, ZHAO Yi-ping, et al. A Method of Combined Weight Distribution for Groundwater Vulnerability Assessment Based on DRASTIC[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(4): 568-572.
- [44] 张翼龙, 陈宗宇, 曹文庚, 等. DRASTIC 与同位素方法在内蒙古呼和浩特市地下水防污性评价中的应用[J]. *地球学报*, 2012, 33(5): 819-825.
- ZHANG Yi-long, CHEN Zong-yu, CAO Wen-geng, et al. The Application of DRASTIC and Isotope Method to the Evaluation of Groundwater Vulnerability in Hohhot, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(5): 819-825.
- [45] 张泰丽, 冯小铭, 刘红樱, 等. 基于 DRASTIC 的丽水市地下水防污性能评价[J]. *地球与环境*, 2012, 40(1): 115-120.
- ZHANG Tai-li, FENG Xiao-ming, LIU Hong-ying, et al. Assessment of Groundwater Vulnerability in Lishui City Based on DRASTIC[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(1): 115-120.

沉痛哀悼《地球科学与环境学报》编委陈梦熊院士

中国科学院资深院士、新中国水文地质工程地质事业的奠基人和创始人之一、国土资源部咨询研究中心咨询委员陈梦熊先生因病于 2012 年 12 月 28 日 23 时 49 分在北京逝世,享年 96 岁。

陈梦熊院士 1917 年 10 月 12 日生于江苏南京,籍贯浙江上虞,水文地质学家,1942 年西南联合大学地质地理气象系毕业,1991 年当选为中国科学院学部委员(院士),是国土资源部咨询研究中心咨询委员、中国地质调查局高级咨询专家,曾任地质矿产部水文地质工程地质局副总工程师,主管水文地质科技业务,领导完成中国区域水文地质普查工作。

20 世纪 80 年代以来,致力于地下水资源与环境水文地质问题的研究,在国内外先后发表论文 140 余篇,完成国际水文计划(IHP)2 项国际合作研究课题。其代表作有《中国地下水资源与环境》、《中国水文地质环境地质问题研究》和《中国水文地质工程地质事业的发展与成就》。